

Таким образом, переход от статического режима нагнетания жидкости к импульсному, позволяет более активно воздействовать на краевую часть напряженно-деформированных угольных пластов и эффективно использовать энергию газа и горного массива в процессе перераспределения напряжений, иницировании деформаций сдвига и разнонаклонного трещинообразования. Эти процессы способствуют интенсификации газовыделения и повышению эффективности гидрорыхления, что в свою очередь повышает уровень безопасности при ведении горных работ на выбросоопасных угольных пластах.

#### Список литературы

1. Ржевский В.В. Управление свойствами и состоянием угольных пластов с целью борьбы с основными опасностями в шахтах / В.В. Ржевский, Б.Ф. Братченко, Н.В. Ножкин; под общей ред. В.В. Ржевского. – М.: Недра, 1984. – 327 с.
2. Васючков Ю.Ф. Физико-химические способы дегазации угольных пластов / Ю.Ф. Васючков. – М.: Недра, 1986. – 155 с.
3. Импульсно-волновое возмущение в скважине при пневмогидравлическом способе добычи угля / А.Н. Зорин, В.Г. Колесников, А.Т. Диденко, Я.Т. Пирич // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1984. – №4. – С. 88 – 92.
4. Софийский К.К. Нетрадиционные способы предотвращения выбросов и добычи угля / К.К. Софийский, А.П. Калфакчян, Е.А. Воробьев. – М.: Недра. – 1994. – 192 с.
5. Зберовский В.В. Обоснование метода и параметров активной дегазации выбросоопасных пластов на больших глубинах / В.В. Зберовский // Науковий Вісник Національної гірничої Академії. – Днепропетровск, 2000. – №1. – С. 28–32.
6. Правила ведения горных работ на пластах склонных к газодинамическим явлениям. – К.: Минуглепром Украины, 2005. – 224 с.
7. Жулай Ю.А. Решение концептуальных задач гидроимпульсного рыхления выбросоопасных угольных пластов в режиме периодически срывной кавитации / Жулай Ю.А., Зберовский В.В. // Збірник наукових праць НГУ України. – Дніпропетровськ: РВК НГА, 2010 - № 35, Том 2 – С. 246-253.
8. Васильев Л.М. Механизм формирования горизонтальных нормальных напряжений в массивах горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень МГТУ. - М.: Мир горной книги, 2008г. - №5.- С. 190-195.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Бойком В.А.  
Надійшла до редакції 22.03.2012*

УДК 622.831.322:532.528

© В.В. Зберовский, Л.М. Васильев, Д.Л. Васильев, Ю.Е. Поляков

## ГИДРОИМПУЛЬСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ВЫБРОСООПАСНЫЙ УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ

Рассмотрены результаты исследований параметров гидроимпульсного воздействия при гидрорыхлении выбросоопасных угольных пластов с целью предотвращения внезапных выбросов угля и газа.

Розглянуто результати досліджень параметрів гідроімпульсної дії при гідророзпушуванні викиднебезпечних вугільних пластів з метою запобігання раптовим викидам вугілля і газу.

The results of parameters researching of the hydro-pulse influence at hydro breaking of outburst coal layers are considered with the purpose of prevention of the instantaneous outburst of coal and gas.

Решение проблемы газодинамического фактора при освоении углегазовых месторождений неразрывно связано с исследованием сложных геомеханических процессов, протекающих в краевой части пласта. Специалисты всех угледобывающих государств занимаются решением задач в данной области исследований. Однако до настоящего времени нет общепризнанной теории напряженно-деформированного состояния (НДС) и саморазрушения краевой части выбросоопасных угольных пластов. Вместе с тем имеется ряд гипотез и моделей запредельного состояния горных пород, а так же природы и механизма внезапных выбросов, которые положены в основу способов гидродинамического воздействия с целью предотвращения газодинамических явлений [1–3].

Сложность решения задач в данной области исследований в первую очередь поясняется многофакторностью и тем, что в условиях больших глубин углепородный массив уже находится в напряженно-деформированном состоянии. Фильтрация газа и жидкости в нем практически отсутствует. Кроме этого, при ведении горных работ в краевой части пласта формируются зоны от разгруженного до запредельного квазистатического состояния угольного массива.

В краевой части пласта между водопроницаемостью угольных пластов и горным давлением  $P$  имеется четкая обратная связь – при увеличении горного давления она уменьшается и, наоборот, по мере уменьшения горного давления водопроницаемость возрастает. Коэффициент проницаемости жидкости  $k$  в этих зонах имеет прямо противоположные значения, от максимальных значений при свободном течении потока жидкости по трещинам, до практического отсутствия фильтрации вообще (рис. 1).

Как показала практика проведения профилактических мероприятий при высоконапорном нагнетании жидкости, расположение фильтрационной камеры в разгруженной зоне приводит к фильтрации жидкости по трещинам в выработанное пространство. При расположении камеры в зоне с повышенным горным давлением или за ней, из-за низкой водопроницаемости угля происходят неуправляемые процессы гидроразрыва пласта или гидроотжима.

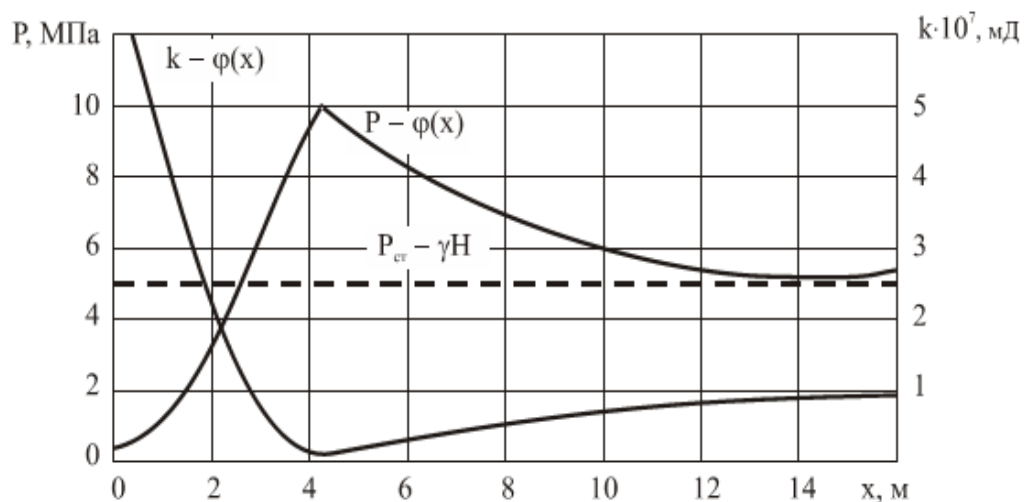


Рис.1. Изменение водопроницаемости угля и величины горного давления на удалении от забоя выработки

В условиях больших глубин высоконапорное нагнетание жидкости в статическом режиме не дает желаемых результатов и не обеспечивает в полной мере безопасность ведения горных работ. В условиях неразгруженных угольных пластов, единственным безопасным способом проведения выработок является применение буровзрывных работ в режиме сотрясательного взрывания. Что в свою очередь является сдерживающим фактором проведения выработок и дополнительным источником провоцирования возгорания метановоздушной смеси.

На протяжении нескольких десятилетий Институтом геотехнической механики НАН Украины ведутся исследования импульсного нагнетания жидкости. Для увлажнения угольных пластов с целью пылеподавления были разработаны насосные установки УНР и УНИ. В настоящее время на базе этого оборудования ведется разработка способа гидроимпульсного рыхления выбросоопасных угольных пластов при проведении выработок комбайнами. Горно-экспериментальные работы, проведенные в условиях шахт ПАО «Краснодон-уголь» позволили оценить надежность и эффективность способа.

В промышленных условиях были подтверждены аналитические и лабораторные исследования механизма гидроимпульсного разрушения выбросоопасных угольных пластов. Вместе с тем решение задачи предельного состояния угольного пласта при гидроимпульсном воздействии или при каком-либо ином режиме высоконапорного нагнетания жидкости в условиях больших глубин не имеет достаточно точного решения.

Учитывая, что эффективность профилактических мероприятий зависит, не только от гидродинамических параметров и свойств горных пород, а и от перераспределения напряжений в массиве, был выполнен анализ теорий внезапных выбросов угля и газа и предельного состояния материалов, раскрывающих природу их разрушения. При проведении исследований было учтено, что теории предельного состояния материалов основаны на результатах исследований образцов в лабораторных условиях. Поэтому, для получения результата, который будет соответствовать рассматриваемой нами задаче, необходимо объединить факторы, объединяющие эти направления исследований.

Для определения гидродинамических параметров и условий решения задачи была использована модель предельного состояния выбросоопасных угольных пластов при их гидрорыхлении [4]. В модели предельного состояния угольного пласта при гидроимпульсном воздействии учитываются как физико-механические свойства угля, так и НДС углепородного массива. Для краевой части пласта условие равновесия сил на контактирующих поверхностях угольный пласт – вмещающие породы запишется с учетом закона Кулона-Амонтона следующим образом:

$$(P_n - P_l)m_n = 2f\gamma_n H(l_z - l_0), \quad (1)$$

где  $P_n$  – давление нагнетания жидкости, МПа;  $P_l$  – давление жидкости в кромке пласта, МПа;  $m_n$  – мощность пласта, м;  $f$  – коэффициент внешнего трения меж-

ду углем и вмещающими породами;  $\gamma_n$  – удельный вес горных пород т/м<sup>3</sup>;  $H$  – глубина залегания м;  $l_c$  – глубина герметизации шпура, м;  $l_0$  – разрушенная часть кромки пласта, м;

Гидроотжим или его признаки могут проявиться при условии, если давление газа в пласте и давление жидкости, создаваемое в фильтрационной камере, превысят силы горного давления и сопротивляемость угля сдвигу. Последняя определяется силами внешнего и внутреннего трения, которые, в свою очередь, характеризуются коэффициентами внешнего и внутреннего трения угля.

При математическом описании граничного состояния угольного пласта при гидроимпульсном воздействии использовано решение системы уравнений [3]. Так как в системе трех уравнений, описывающих условие решения задачи, содержит более трех неизвестных, для её решения был определен один наиболее значимый фактор. Таким параметром – константой, характеризующей механические свойства горных пород, является сопротивляемость их образца правильной формы одноосному раздавливанию. Исходя из этого в основу модели граничного состояния угольного пласта при гидроимпульсном воздействии положено условие равновесия сил, действующих по граням элемента тела (рис. 2).

Для упрощения решения напряжения по граням приняты равномерно-распределенными. При этом учитывается, что породы кровли и угольный пласт являются, как правило, разномодульными, т.е. при их деформировании они имеют разные значения деформаций. Тогда, рассматривая модель векторной диаграммы для определения горизонтальных нормальных напряжений, можем принять, что в качестве граничных условий на одном из катетов равновесного треугольника приложено горное давление в виде вертикальной нагрузки  $\sigma_y = \gamma H$  и контактные касательные напряжения  $f\sigma_y$ . На втором катете действуют горизонтальные напряжения  $\sigma_x$  и те же касательные напряжения  $f\sigma_y$  (по закону парности касательных напряжений), а на наклонной площадке – активные касательные напряжения  $\tau_\alpha$  и нормальные напряжения  $\sigma_\alpha$ .

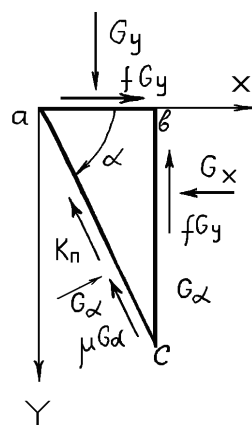


Рис. 2. Векторная диаграмма определения сжимающих горизонтальных нормальных напряжений  $\sigma_x < \sigma_y$

Для решения математической модели удельного давления на образцы горных пород воспользуемся теорией прочности Кулона-Амонтона, которая используется в теории обработки металлов давлением [5].

Из решения системы уравнений [3] для условия равенства напряжения сдвигу материала ( $k$ ) напряжению ( $\tau_3$ ) при экстремальном угле  $\alpha$  относительно горизонтальной оси, на котором эффективные касательные напряжения достигают максимального значения, получено уравнение равновесного состояния горного массива

$$2\tau_3 = \sqrt{(1 + \mu^2)[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4f^2\sigma_y^2]} - \mu(\sigma_x + \sigma_y). \quad (2)$$

Из уравнения (2) путем алгебраических преобразований получено выражение для расчета горизонтального нормального напряжения

$$\sigma_x = -\frac{2(\tau_3 + \mu\sigma_y)}{\cos \rho} \cdot \left( \sin \rho - \sqrt{1 - b^2} \right) + \sigma_y, \quad (3)$$

где  $\rho = \arctg \mu$  – угол внутреннего трения;  $b$  – параметр касательных напряжений  $b = f\sigma_y / (\tau_3 + \mu\sigma_y)$ .

Параметр  $b$  физически означает отношение касательного напряжения от трения на контактной поверхности к максимальному значению касательного напряжения (с учетом внутреннего трения) внутри материала на плоскости, параллельной контактной плоскости.

Так как горизонтальные напряжения в массиве возникают под воздействием давления нагнетаемой жидкости, то учитывая в выражении (3) касательные напряжения и напряжения в массиве можно определить критическое значение давления нагнетаемой жидкости. В результате проведенных преобразований получено выражение для расчета давления импульсного нагнетания, при котором возможно развитие трещин разрушения и проявление гидроотжима

$$P = \frac{1}{m} \int_0^m \left[ \frac{2 \cdot \left( k + \mu \cdot \gamma_n \cdot H \cdot \left( 1 + \frac{f \cdot l_2}{m} \right) \right)}{\cos \rho} \cdot \left( \sin \rho - \sqrt{1 - b^2(y)} \right) + \gamma_n \cdot H \cdot \left( 1 + \frac{f \cdot l_2}{m} \right) \right] dy - P_2 ;$$

$$b(y) = \frac{f \cdot \gamma \cdot H \cdot \left( 1 + \frac{f \cdot l_2}{m} \right) \cdot \left( 1 - \frac{2 \cdot y}{m} \right)}{k + \mu \cdot \gamma \cdot H \cdot \left( 1 + \frac{f \cdot l_2}{m} \right)}, \quad (4)$$

где  $k$  – сопротивление сдвига (сцепление);  $\mu$  – коэффициент внутреннего трения,  $\mu = \tg \rho$ ;  $\rho$  – угол внутреннего трения, град.;  $\gamma_n$  – удельный вес горных пород;  $H$  – глубина залегания;  $f$  – коэффициент трения горных пород в массиве;  $l_2$  – глубина герметизации скважины;  $m$  – мощность пласта;  $P_r$  – давление газа в угольном пласте, МПа;  $y$  – параметр интегрирования.

Давление на входе генератора должно превышать его расчетное значение

$$P_{min} = \frac{\sqrt{2E\gamma}(\sqrt{1+\mu^2+\mu})}{2\mu\sqrt{\pi \cdot l}} + \frac{\gamma_n H \left[ \sqrt{(f+\mu-\eta\mu)^2 + (1-f\mu-\eta)^2} - (f+\mu+\eta\mu) \right]}{2}, \quad (5)$$

где  $E$  – модуль упругости;  $\gamma$  – удельная поверхностная энергия;  $l$  – полудлина трещины;  $\eta$  – коэффициент бокового распора,  $\eta = \sigma_x / \gamma_n H$ , но не превышать давление гидроразрыва пласта  $P_p = 0,75\gamma_n H$  [1].

Углы внутреннего и внешнего трения угля определяются экспериментальным путем.

Отличием предложенного решения является то, что в расчете давления нагнетания жидкости для конкретных горно-геологических условий учитываются как физико-механические свойства угольного пласта, так и напряженно-деформированное состояние углепородного массива.

Учитывая, что интегральное выражение (4) и выражение (5) для проведения инженерных расчётов представляют собой сложное математическое решение, в программном обеспечении Matchcad 14 разработан алгоритм расчёта составляющих параметров модели.

Расчет давления гидроотжима, как критерия граничного состояния краевой части пласта, при высоконапорном нагнетании жидкости выполнен по трём вариантам:

- по нормативной методике гидроотжима и/или гидрорыхления угольных пластов [1];
- по методике высоконапорного нагнетания [6];
- по предложенной модели гидроимпульсного воздействия.

К расчету приняты следующие параметры и показатели пласта  $i_3^I$  гор. 915м, залегающего в условиях СП «Шахтоуправление «Суходольское-Восточное» ПАО «Краснодонуголь»: сопротивление сдвигу (сцепление)  $k=10 \text{ кгс/см}^2$ ; коэффициент внутреннего трения  $\mu=tg\rho$ ; угол внутреннего трения  $\rho=26,57^\circ$ ; удельный вес горных пород  $\gamma=2,65 \text{ т/м}^3$ ; глубина залегания  $H=915 \text{ м}$ ; коэффициент трения горных пород в массиве  $f=0,5$ ; мощность пласта  $m=1,75 \text{ м}$ ; ширина выработки  $b=5,1 \text{ м}$ ; глубина герметизации  $l_2=2,5 \dots 5,5 \text{ м}$ ; глубина скважин для нагнетания жидкости от 6,0 м до 8,0 м.

Принято, что гидроотжим угольного пласта происходит если в условии равновесия сил (1)  $P_I=0$ .

По результатам выполненных расчетов установлены зависимости давления гидроотжима от глубины герметизации шпура при высоконапорном нагнетании жидкости по всем рассмотренным вариантам.

При гидроимпульсном воздействии эмпириоаналитическое уравнение зависимости давления гидроотжима от глубины герметизации при достоверности аппроксимации  $R_2 = 0,9462$  (рис. 3) имеет следующий вид

$$P = 4,123l_2 + 11,478. \quad (6)$$

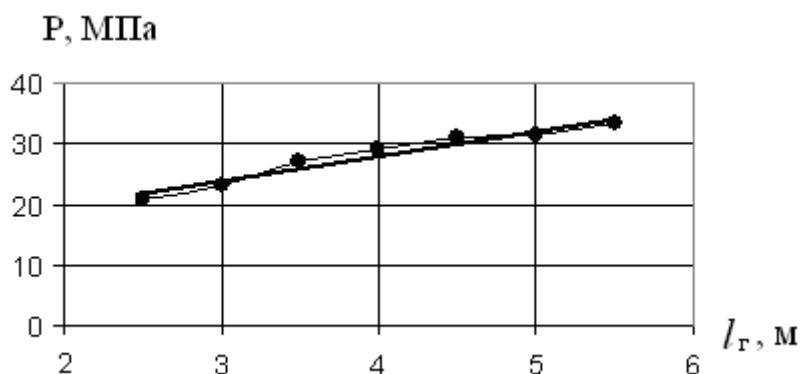


Рис. 3. Зависимость граничного давления нагнетания жидкости от глубины герметизации скважин при гидроимпульсном воздействии

Учитывая, что до настоящего времени исследования вероятности проявления гидроотжима при гидрорыхлении угольных пластов не производились, для анализа и наглядности полученных результатов расчета, совместим полученные графические зависимости (рис. 4). На рисунке: зависимость – 1 характеризует вероятность проявления гидроотжима пласта при его гидрорыхлении по нормативной методике [1], зависимость – 2 при гидроимпульсном воздействии, зависимость – 3 при высоконапорном нагнетании [6].

Анализ установленных зависимостей позволяет отметить, что принятые нормативные методики расчета параметров гидроотжима и гидрорыхления выбороопасных пластов для глубин более 900 м (кривая 1, рис. 4) не соответствуют результатам, установленным практикой для горно-геологических условий залегания выбороопасных угольных пластов Донецкого бассейна.

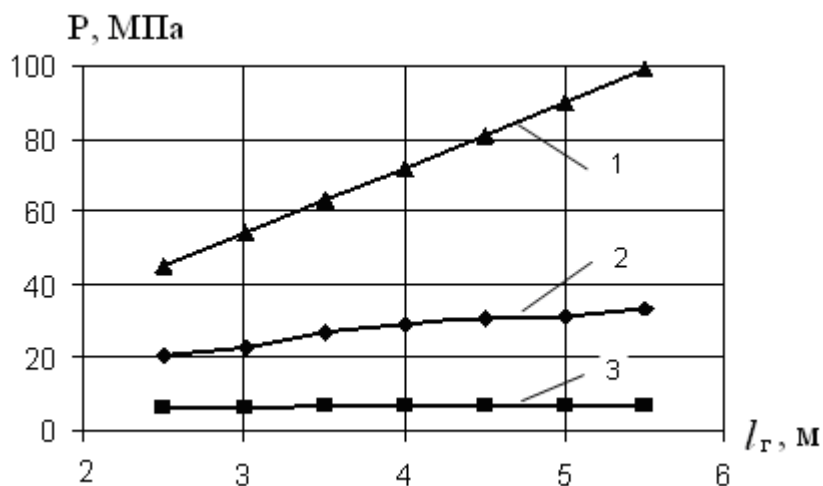


Рис. 4. Зависимости давления гидроотжима от глубины герметизации скважин при нагнетании жидкости

Известно, что при проведении работ по гидроотжиму или гидрорыхлению угольных пластов на глубинах более 800 м с герметизацией шпуров или скважин на глубину более 2,5 м признаки гидроотжима начинают проявляться при давлении нагнетания 20,0 МПа и более. Здесь необходимо отметить, что исследования параметров гидроотжима краевой части при гидрорыхлении выбороопасных угольных пластов на больших глубинах не производились.

Применение модели и методики расчета давления высоконапорного нагнетания жидкости [6] (кривая 3, рис. 4), также требуют корректировки и дополнительных исследований в условиях больших глубин шахт Донецкого бассейна.

Расчет давления гидроотжима по предложенной модели расчета гидроимпульсного воздействия (кривая 2, рис. 4) наиболее точно подтверждаются экспериментальными данными. При проведении горно-экспериментальных работ по гидроимпульсному воздействию на выбросоопасные пласты  $i_3^I$  гор. 915м и  $k_2^H$  гор. 617м, залегающие в условиях шахт ПАО «Краснодонуголь» установлено следующее.

При гидрорыхлении пластов по нормативной методике через скважины длиной от 6,0 м до 8,0 м установлено, что признаки гидроразрыва пласта проявляются при давлении жидкости 0,75γН и более. Для глубины более 650 м это составляет 15,0...18,0 МПа. Признаки гидроотжима прослоев угля проявляются при давлении более 18,0 МПа. Для глубины более 900 м признаки гидроразрыва и гидроотжима прослоев угля проявляются при давлении более 23,0 МПа.

При гидроимпульсном рыхлении пластов по технологической схеме нормативного способа гидрорыхления в диапазоне давления 14,0...23,0 МПа признаков проявления гидроразрыва пласта или гидроотжима зафиксировано не было.

Исходя из проведенных исследований, сделаны следующие выводы.

Отличительной особенностью в расчете параметров гидроимпульсного воздействия на выбросоопасные угольные пласты является, то что в физической модели граничного состояния краевой части пласта и математической модели расчета давления высоконапорного нагнетания жидкости учитываются, как напряженно-деформированное состояние массива, так и физико-механические свойства угля.

Алгоритм расчёта параметров нагнетания жидкости в программном обеспечении Matchcad 14 упрощает сложное решение интегральных выражения и позволяет вести инженерные расчеты задач на ПЭВМ.

Результаты горно-экспериментальных работ в полной мере подтверждают теоретические исследования и лабораторные испытания способа.

#### Список литературы

1. СОУ 10.1.00174088.011-2005, Правила ведения горных работ на пластах склонных к газодинамическим явлениям. Киев, Минуглепром Украины, 2005. –224 с.
2. Булат А.Ф., Софийский К.К., Силин Д.П. и др., Гидродинамическое воздействие на газонасыщенные угольные пласты, Днепропетровск, 2003.–220с.
3. Васильев Д.Л. Закономерности формирования горизонтальных нормальных напряжений в массиве горных пород / Д.Л. Васильев // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2001. – Вып. 29. – С. 17–21.
4. Зберовский В.В. Предельное состояние выбросоопасных угольных пластов при их гидрорыхлении с учетом сопротивляемости угля сдвигу / В.В. Зберовский, Ю.А. Костандов // Збірник наукових праць НГУ України. – Дніпропетровськ: РВК НГА, 2011 - № 36, Том № 2.– С. 36–43.
5. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Наука, 1967. – 423 с.
6. Теоретические основы гидроотжима и гидрорыхления на угольных шахтах / А.А. Борисенко. – М.: «Наука», 1986. – 114 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Бойком В.А.  
Надійшла до редакції 22.03.2012*